

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

MENU

SEARCH

INDEX

1/1



JAPANESE PATENT OFFICE

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number: 09243806

(43)Date of publication of application: 19.09.1997

(51)Int.Cl.

G02B 3/14  
G02F 1/13

(21)Application number: 08056454

(71)Applicant:

OLYMPUS OPTICAL CO LTD

(22)Date of filing: 13.03.1996

(72)Inventor:

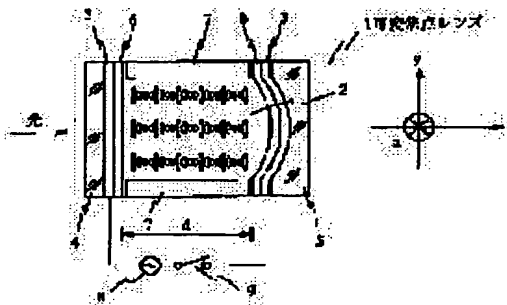
NISHIOKA KIMIHIKO

(54) OPTICAL CHARACTERISTIC VARIABLE OPTICAL ELEMENT

(57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To obtain an optical hydrophilic variable optical element which is simple in structure, is low in light quantity loss, is derivable by a low voltage and obviates the occurrence of unhappiness by using liquid crystals having a twist pitch smaller than the wavelength of the light transmitted through the liquid crystals.

**SOLUTION:** A variable forces lens 1 is constituted by holding chiral nematic liquid crystals 2 between flat plate glass 4 and lens 5 respectively formed with transparent electrode film 3 on the inner side via oriented film 6 and is sealed with a sealant 7. The pitch of the twists of the liquid crystals 2 is made extremely smaller than the wavelength of the light. The lens 5 acts as a lens having a refractive index  $n'$  without depending on the polarization of incident light where  $n'$  is defined as  $n' = (n_e + n_0)/2$  ( $n_e$  is refractive index to the polarization in the major axis direction of the liquid crystal molecules,  $n_0$  is refractive index to the polarization in the minor axis direction of the liquid crystal molecules). When an electronic field is impressed between the oriented films 6, the arrangement of the liquid crystal molecules changes and the liquid crystals 2 turn to isotropic media having the refractive index  $n_0$ .



LEGAL STATUS

Japanese Patent Preliminary Publication No. Hei 9-243806

--- translation of the portion marked A on pages 2-6 (paragraphs [0011]-[0044]) ---

[0011]

[Measures to Solve Problems]

An optical characteristic variable optical element according to the present invention is constructed such that liquid crystal is contained in a sealed space formed by a pair of members and that an external physical action controls orientation status of liquid crystal molecules of the liquid crystal to thereby change optical characteristics of the liquid crystal, wherein the liquid crystal has a twist pitch smaller than a wavelength of light transmitted therethrough.

[0012] Since the liquid crystal has a twist pitch smaller than the wavelength of light transmitted therethrough, the optical characteristic variable optical element according to the present invention is simple in structure, has a small loss in amount of light, causes no blur of an image, and can be driven by a low voltage to change its optical characteristics.

[0013]

[Modes for Carrying out Invention] Embodiments of the present invention will be described in reference to the drawings.

[0014] Fig. 1 through Fig. 17 are directed to a first embodiment of the present invention. Fig. 1 shows the general configuration of a variable focus lens. Fig. 2 shows a refractive index ellipsoid of a molecule of the chiral nematic liquid crystal shown in Fig. 1. Fig. 3

is an explanatory view for explaining the function of the variable focus lens shown in Fig. 1. Fig. 4 shows a specific configuration of the variable focus lens shown in Fig. 1. Fig. 5 shows the liquid crystal molecular arrangement of chiral smectic liquid crystal in the chiral smectic-C phase used in a first modified example of the variable focus lens shown in Fig. 1. Fig. 6 shows the configuration of a variable focus lens that uses the chiral smectic liquid crystal shown in Fig. 5. Fig. 7 is an explanatory view for explaining the function of the variable focus lens shown in Fig. 6. Fig. 8 shows the configuration of a second modified example of the variable focus lens shown in Fig. 1 where chiral cholesteric liquid crystal is used. Fig. 9 is an explanatory view for explaining the function of the variable focus lens shown in Fig. 8. Fig. 10 shows measured values of reflectance with respect to the chiral cholesteric liquid crystal shown in Fig. 8. Fig. 11 shows the configuration of a second modified example of the variable focus lens shown in Fig. 1 where discotic liquid crystal is used. Fig. 12 is an explanatory view for explaining the function of the variable focus lens shown in Fig. 11. Fig. 13 shows a refractive index ellipsoid of a molecule of the discotic liquid crystal shown in Fig. 11. Fig. 14 is a first Z-direction view of the discotic liquid crystal shown in Fig. 12. Fig. 15 is a second Z-direction view of the discotic liquid crystal shown in Fig. 12. Fig. 16 shows a configuration of a variable focus lens in which the orientation of the chiral nematic liquid crystal shown in Fig. 1 is changed by application of the magnetic field. Fig. 17 shows a configuration of a variable focus lens in which the orientation of the chiral nematic liquid crystal shown in Fig. 1 is changed by use of temperature variation.

[0015] As shown in Fig. 1, a variable focus lens 1, as the optical property variable optical element according to the first embodiment, is basically constructed such that a plane plate glass 4 and a lens 5, whose inside faces are coated with transparent electrode films 3, respectively, sandwich chiral nematic liquid crystal 2 with intervention of orientation films 6 and then are sealed with seal material 7, wherein the twist pitch  $P$  of the chiral nematic liquid crystal 2 is very much smaller than the wavelength  $\lambda$  of the light. Namely,

$$[\text{Math. 1}] \quad P \ll \lambda \quad (1)$$

When the pitch  $P$  is very much smaller than the wavelength  $\lambda$  as in this case, the lens 5 acts as a lens having a refractive index  $n'$  irrespective of the polarization condition of the incident light.

[0016]

[Math. 2]

$$n' = \frac{n_e + n_o}{2} \quad (2)$$

where  $n_e$  is a refractive index for polarized light in a direction of the major axis of the liquid crystal molecules, and  $n_o$  is a refractive index for polarized light in a direction of the minor axis of the liquid crystal molecules. Fig. 2 shows a refractive index ellipsoid that corresponds to a liquid crystal molecule on the incident side of the chiral nematic liquid crystal 2, where  $x$  axis and  $z$  axis coincide with the minor axes of the liquid crystal molecule,  $y$  axis coincides with the major axis of the liquid crystal molecule, and  $n_e > n_o$ .

[0017] We will explain below why the chiral nematic liquid crystal 2 according to the present embodiment acts in effect as an isotropic medium

having the refractive index  $n'$ , using Jones vectors and matrix.

[0018] According to Expressions 3.107, 3.110 and 3.126 shown in pages 85-92 of the above-cited document 1, where variation  $\exp(-i\alpha)$  of absolute phases are incorporated, Jones matrix  $W_t$  for the chiral nematic liquid crystal 2 with the thickness  $d$  shown in Fig. 1 is given as

[Math. 3]

$$W_t = e^{i\alpha} R(-\Phi) \begin{pmatrix} \cos X - i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} & \Phi \frac{\sin X}{X} \\ -\Phi \frac{\sin X}{X} & \cos X + i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} \end{pmatrix} \quad (3)$$

where

[Math. 4]

$$\Phi = \frac{2\pi d}{P} \quad (4)$$

[Math. 5]

$$\Gamma = 2\pi(n_e - n_o) \frac{d}{\lambda} \quad (5)$$

[Math. 6]

$$\alpha = 2\pi \frac{(n_e + n_o)}{2} \frac{d}{\lambda} \quad (6)$$

[Math. 7]

$$X = \sqrt{\Phi^2 + \frac{\Gamma^2}{2}} \quad (7)$$

[Math. 8]

$$R(-\Phi) = \begin{pmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi \\ \sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \quad (8)$$

[0019] In these expressions, where an ordinary ray is defined as polarized light in the direction of the minor axis of a liquid crystal molecule, and an extraordinary ray is defined as polarized light in the

direction of the major axis of the liquid crystal molecule or is defined as polarized light in the direction of a projection of the major axis on a plane perpendicular to the optical axis,  $\Gamma$  represents the phase difference between the ordinary ray and the extraordinary ray caused by the chiral nematic liquid crystal 2.

[0020] Also,  $\Phi$  is the twist angle, in radian, of the liquid crystal molecules of the chiral nematic liquid crystal 2. The coordinate system applied to Expression (3) and Expression (8) takes  $x, y, z$  axes that are shown in Fig. 1. Thus,  $x$  axis runs from the front side toward the rear side of the figure, and  $y$  axis runs in the direction of the major axis of the liquid crystal molecules on the entrance surface of the chiral nematic liquid crystal 2.

[0021] Now, let us discuss how  $W_t$  in Expression (3) behaves under the condition of Expression (1).

[0022] Expression (1) can be transformed to

[Math. 9]

$$0 < \frac{P}{\lambda} \ll 1 \quad (9)$$

Here, let us obtain the limitvalue  $W_t L$  of Expression (3) as  $P/\lambda \rightarrow 0$ .

[0023] Since

[Math. 10]

$$\frac{\Gamma}{\Phi} = 2\pi(n_e - n_o) \frac{P}{\lambda} \quad (10)$$

if  $P/\lambda \ll 1$ , then

[Math. 11]

$$\left| \frac{\Gamma}{\Phi} \right| \ll 1 \quad (11)$$

Therefore,  $|\Gamma/\Phi| \rightarrow 0$  as  $|P/\lambda| \rightarrow 0$ .

[0024] Under the condition of Expression (11), the following approximations can be made:

[Math. 12]

$$X = \Phi \sqrt{1 + \frac{\Gamma^2}{2\Phi^2}} \approx \Phi + \frac{\Gamma^2}{4\Phi} \quad (12)$$

[Math. 13]

$$\cos X \approx \cos \left( \Phi + \frac{\Gamma^2}{4\Phi} \right) \quad (13)$$

[Math. 14]

$$\frac{\Gamma \sin X}{2 X} \approx \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin \left( \Phi + \frac{\Gamma^2}{4\Phi} \right)}{\Phi + \frac{\Gamma^2}{4\Phi}} \quad (14)$$

[Math. 15]

$$\Phi \frac{\sin X}{X} \approx \frac{\sin \left( \Phi + \frac{\Gamma^2}{4\Phi} \right)}{1 + \frac{\Gamma^2}{4\Phi^2}} \quad (15)$$

Thus, as  $P/\lambda \rightarrow 0$ ,

$$[Math. 16] \quad X \rightarrow \Phi \quad (16)$$

$$[Math. 17] \quad \cos X \rightarrow \cos \Phi \quad (17)$$

[Math. 18]

$$\frac{\Gamma \sin X}{2 X} \rightarrow 0 \quad (18)$$

[Math. 19]



$$\Phi \frac{\sin X}{X} \rightarrow \sin \Phi \quad (19)$$

Therefore, as  $P/\lambda \rightarrow 0$ ,

[Math. 20]

$$W_{IL} \rightarrow e^{-i\alpha} R(-\Phi) \begin{pmatrix} \cos \Phi & \sin \Phi \\ -\sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} = e^{-i\alpha} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

This is the very Jones matrix for a medium that is isotropic with respect to the optical axis with the refractive index  $n' = (n_e + n_o)/2$  and the thickness  $d$ .

[0025] On this ground, it can be said that since  $P/\lambda \ll 1$ , the variable focus lens 1 shown in Fig. 1 functions as a lens with the refractive index  $n'$  and accordingly is able to form an image without blur.

[0026] Also, in the variable focus lens of Fig. 1, when an AC power supply 8 is made ON by a switch 9 to give an electric field between the orientation films 6, the chiral nematic liquid crystal 2 forms an array as shown in Fig. 3 and becomes an isotropic medium with the refractive index of  $n_o$ , or an liquid crystal lens having a different focal length than that in the state of Fig. 1. As a result, a variable focus lens without blur of the image can be realized.

[0027] Next, a specific configuration example of the above-stated variable focus lens 1 will be explained. As shown in Fig. 4, the variable focus lens 1 is specifically configured to be given a continuously variable voltage by a variable resistor 21 and thus arrangement of its liquid crystal molecules can assume a middle status between the statuses shown in Fig. 1 and Fig. 3. As a result, a liquid crystal lens with continuously variable focal length can be realized.

[0028] It is noted that the above Expressions (3) - (20) are satisfied even in the case of the middle status shown in Fig. 4 if the value of  $n_e$  is substituted by the refractive index  $n_e'$  of the extraordinary ray, which is the mean of  $n_e$  and  $n_o$ .

[0029] It is also noted that the configuration shown in Fig. 4 allows the applied voltage to be selected among several discrete values, not limited to the continuously variable values, to realize a variable focus lens.

[0030] Here, a practical example of the variable focus lens 1 configured as shown in Fig. 4 is explained in detail.

[0031] While Expression (20) expresses the limitvalue as  $P/\lambda \rightarrow 0$ , we will introduce an approximation of Expression (3) considering the fact that the limitvalue is not always applicable to a practical liquid crystal lens, or a variable focus lens.

[0032] If Expression (3) is approximated upon considering first or lower order terms of  $P/\lambda$ , in other words, if second or higher order terms of  $P/\lambda$  are ignored in Expressions (12) - (14), or first or lower order terms of  $\Gamma/\Phi$  in Expression (10) are considered with second or higher order terms of  $P/\lambda$  and second or higher order terms of  $\Gamma/\Phi$  being ignored, the following expression will be derived.

[Math. 21]

$$\cos X - i \frac{\Gamma \sin X}{2 X} \approx \cos \left( \Phi + \frac{\Gamma \Gamma}{4 \Phi} \right) - i \frac{\Gamma}{2 \Phi} \sin \left( \Phi + \frac{\Gamma \Gamma}{4 \Phi} \right) \quad (21)$$

Accordingly,

[Math. 22]

$$\Phi \frac{\sin X}{X} \approx \sin \left( \Phi + \frac{\Gamma \Gamma}{4 \Phi} \right) \quad (22)$$

[Math. 23]

$$W_i \approx e^{i\alpha} R(-\Phi) \begin{pmatrix} \cos\left(\Phi + \frac{\Gamma}{4} \frac{\Gamma}{\Phi}\right) - i \frac{\Gamma}{2\Phi} \sin\left(\Phi + \frac{\Gamma}{4} \frac{\Gamma}{\Phi}\right) & \sin\left(\Phi + \frac{\Gamma}{4} \frac{\Gamma}{\Phi}\right) \\ -\sin\left(\Phi + \frac{\Gamma}{4} \frac{\Gamma}{\Phi}\right) & \cos\left(\Phi + \frac{\Gamma}{4} \frac{\Gamma}{\Phi}\right) + i \frac{\Gamma}{2\Phi} \sin\left(\Phi + \frac{\Gamma}{4} \frac{\Gamma}{\Phi}\right) \end{pmatrix} \equiv W_{tN} \quad (23)$$

are obtained. Therefore, if the value of  $|i \cdot \Gamma/2\Phi|$  is close to zero, the value of  $W_{tN}$  can be regarded as substantially equal to the Jones matrix of an isotropic medium. In this condition,  $W_{tN}$  is close to

[Math. 24]

$$e^{-i\alpha} \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\Gamma}{4} \frac{\Gamma}{\Phi}\right) & \sin\left(\frac{\Gamma}{4} \frac{\Gamma}{\Phi}\right) \\ -\sin\left(\frac{\Gamma}{4} \frac{\Gamma}{\Phi}\right) & \cos\left(\frac{\Gamma}{4} \frac{\Gamma}{\Phi}\right) \end{pmatrix} \quad (24)$$

This expression means that the liquid crystal can be regarded as an isotropic medium while polarization direction of incident light twists by  $\Gamma/4 \cdot \Gamma/\Phi$ .

[0033]

If

[Math. 25]

$$\left| i \frac{\Gamma}{2\Phi} \right| \approx 0 \quad (25)$$

, or

[Math. 26]

$$\left| \frac{\Gamma}{2\Phi} \right| \ll 1 \quad (26)$$

a variable focus lens without image blur can be obtained. Expression (10) introduces

[Math. 27]

$$\frac{\Gamma}{2\Phi} = \pi(n_e - n_o) \frac{P}{\lambda} \quad (27)$$

[0034] If the variable focus lens of the present invention is applied to such a photographing apparatus provided with lenses as is a relatively inexpensive product having a solid state image sensor with a small number of picture elements and as is not always required to achieve high image definition, namely, an electronic camera, a VTR camera, an electronic endoscope or the like, the requirement condition may be less limiting than Expression 26. In this case, satisfaction of

[Math. 28]

$$\left| \frac{\Gamma}{2\Phi} \right| < 1 \quad (28)$$

is sufficient.

[0035] Since lenses for products with high image quality such as a lens for an electronic image pickup device having a large number of picture elements, a lens for a film camera, and a lens for a microscope are required to achieve high image definition, satisfaction of

$$\left| \frac{\Gamma}{2\Phi} \right| < \frac{\pi}{6} \quad (29)$$

is required.

[0036] For lenses that are not used for image formation, such as a lens used with an optical disc, the requirement condition is much less limiting as

$$\left| \frac{\Gamma}{2\Phi} \right| < \frac{\pi}{2} \quad (30)$$

[0037] It is noted, as a general matter applicable to the present embodiment, that when liquid crystal forms a spiral array or when the major axes of liquid crystal molecules are directed non-orthogonal to, or oblique with respect to the optical axis, Expressions (26) - (30) could be effective upon  $n_e$  being replaced by  $n_e'$ .

[0038] Several design examples are listed as follows.

[0039] If the thickness  $d$  of the chiral nematic liquid crystal is too small, lens power is too weak to avail. On the other hand, if too large, light is scattered to cause flare. Therefore, the range

$$[\text{Math. 31}] \quad 2\mu < d < 300\mu \quad (31)$$

is appropriate. If visible light is considered for use, for example, the range of the wavelength  $\lambda$  of the light is expressed by

$$[\text{Math. 32}] \quad 0.35\mu < \lambda < 0.7\mu \quad (32)$$

[0040] While the value of  $n_e - n_o$  varies dependent on the properties of the liquid crystal, most of substances have the value in the range of

$$[\text{Math. 33}] \quad 0.01 < |n_e - n_o| < 0.4 \quad (33)$$

Therefore, if a first design example is made with the parameters being set as follows

$$d = 15\mu$$

$$\lambda = 0.5\mu$$

$$n_e - n_o = 0.2$$

$$P = 0.05\mu,$$

Expressions (26), (28), (29), (30) are satisfied with  $\Gamma/2\Phi = \pi \cdot 0.2 \times 0.05/0.5 = 0.02\pi$ .

[0041] If a second design example is made with the parameters being

set as follows

$$d = 30\mu$$

$$\lambda = 0.6\mu$$

$$n_e - n_o = 0.25$$

$$P = 0.3\mu,$$

Expressions (26), (28), (29), (30) are satisfied with  $\Gamma/2\Phi = \pi \cdot 0.3 \times 0.25/0.6 = 0.125\pi$ .

[0042] If a third design example is made with the parameters being set as follows

$$d = 50\mu$$

$$\lambda = 0.55\mu$$

$$n_e - n_o = 0.2$$

$$P = 0.6\mu,$$

Expressions (28), (30) are satisfied with  $\Gamma/2\Phi = \pi \cdot 0.2 \times 0.6/0.55 = 0.109\pi$ .

[0043] Furthermore, if a variable focus lens for near-infrared light is considered as a fourth design example with the parameters being set as follows

$$d = 200\mu$$

$$\lambda = 0.95\mu$$

$$n_e - n_o = 0.2$$

$$P = 0.7\mu,$$

Expressions (26), (28), (29), (30) are satisfied with  $\Gamma/2\Phi = \pi \cdot 0.2 \times 0.7/0.95 = 0.1458\pi$ .

[0044] In the above-listed design examples, explanation is made based on use of chiral nematic liquid crystal. In order to make the spiral pitch of the chiral nematic liquid crystal smaller than the wavelength

of light in use, it is preferred to mix chiral dopant into the liquid crystal.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-243806

(43) 公開日 平成9年(1997)9月19日

(51) Int.Cl. <sup>9</sup>	識別記号	片内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 2 B 3/14			G 0 2 B 3/14	
G 0 2 F 1/13	5 0 5		G 0 2 F 1/13	5 0 5

審査請求 未請求 請求項の数 1 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願平8-56454

(22) 出願日 平成8年(1996)3月13日

(71) 出願人 000000376

オリンパス光学工業株式会社

東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号

(72) 発明者 西岡 公彦

東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号 オリ

ンパス光学工業株式会社内

(74) 代理人 弁理士 伊藤 進

(54) 【発明の名称】 光学特性可変光学素子

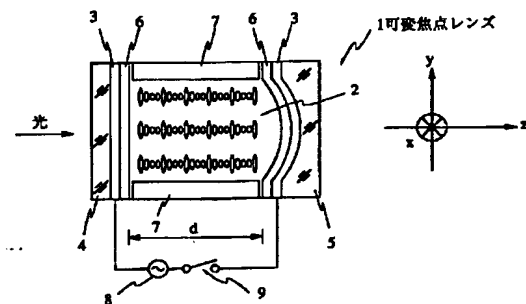
(57) 【要約】

【課題】 構造が簡単で、光量損出が少なく低電圧により駆動可能でボケが生じることなく、光学特性を変化させる。

【解決手段】 光学特性可変光学素子としての可変焦点レンズ1は、カイラルネマテック液晶2を、内側に透明電極膜3をそれぞれ被膜させた平板ガラス4とレンズ5との間に配向膜6を介して挟み、シール材7により封止した構成が基本構成となっており、カイラルネマテック液晶2の捩れのピッチPは、光の波長 $\lambda$ に比べ非常に小さいものとする。つまり、

$P \ll \lambda$  (1)

である。このように、ピッチPが光の波長 $\lambda$ に比べて非常に小さいと、レンズ5は入射光の偏光によらず、屈折率 $n'$ をもつレンズとして作用する。





## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 1対の部材により形成される空間に液晶を封入し、外部からの物理的作用により前記液晶の液晶分子の配向状態を制御し、前記液晶の光学特性を変化させる光学特性可変光学素子において、前記液晶は、前記液晶を透過する光の波長に比べて、小さい捻れピッチを持つことを特徴とする光学特性可変光学素子。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は光学特性可変光学素子、更に詳しくは光学特性を変化させる光学特性可変光学素子に関する。

## 【0002】

【従来の技術】 ズームレンズあるいは撮像装置のピント合せでは、通常レンズを機械的に移動することが行なわれている。

【0003】 しかし、レンズ系の全体、あるいは一部を移動することは、超小型であることが要求される電子内視鏡やマイクロマシンの眼等では不可能であり、また、テレビカメラ、電子スチルカメラや銀塩フィルムカメラ等でも、軽量化、コストダウンのためには、レンズ系を移動させずにズーム、ピント合わせができることが望ましい。

【0004】 そこで、従来より、これらの課題をレンズの移動を行わずに解決する手段として、例えば特開平5-34656号公報や特開平4-345124号公報に、可変焦点レンズが提案されている。

【0005】 例えば特開平5-34656号公報に提案されている可変焦点レンズ201は、図29に示すように、液晶分子の長軸を360° 捻ったカイラルネマチック液晶202を、内側に透明電極膜203をそれぞれ被膜させた平板ガラス204とフネネルズ基板205との間に配向膜206を介して挟み、シール材207により封止した構成となっている。

【0006】 このような構成の可変焦点レンズ201において、電源208をスイッチ209によりONにし配向膜206間に電場を与えると、カイラルネマチック液晶202は、図30に示すように、ホメオトロピック配向となり、入射光の偏光に対して等方的で、かつカイラルネマチック液晶202の屈折率は、図29の状態に比べて低いか、あるいは偏光の方向によっては等しい状態になる。

【0007】 図29の状態、入射光の偏光方向と入射側のカイラルネマチック液晶202の液晶分子210の長軸（図29の楕円体の長い方向）が等しい場合には、カイラルネマチック液晶202の屈折率は高くなり、入射光の偏光方向と入射側の液晶分子の短軸方向とが一致している場合には、カイラルネマチック液晶202の屈折率は低くなる。

【0008】 なぜならば、この例では、カイラルネマチック液晶202の捻れのピッチPは10 $\mu$ ~30 $\mu$ であって、光の波長 $\lambda$ （可視光ならおよそ0.4 $\mu$ ~0.7 $\mu$ ）に比べてはるかに大きいので、左方から入射した光は、液晶分子の捻れに習って偏光が回転して進む。この理由は、例えば「吉野勝美、尾崎雅則 共著；液晶とディスプレイ応用の基礎P91~P93；コロナ社」（以下、文献1と記す）に示されているので説明は省略する。

## 10 【0009】

【発明が解決しようとする課題】 従って、入射側の液晶分子の長軸方向の偏光に対しては図29の可変焦点レンズ201の焦点距離は短かく、また、入射側の液晶分子の短軸方向の偏光に対しては図29の可変焦点レンズ201の焦点距離は長くなってしまい、従来の可変焦点レンズ201は2重焦点レンズとなり、ボヤけた像しか結像せず、目的とする可変焦点レンズを実現できない欠点がある。

【0010】 本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、構造が簡単で、光量損出が少なく低電圧により駆動可能でボケが生じることなく、光学特性を変化させる光学特性可変光学素子を提供することを目的としている。

## 【0011】

【課題を解決するための手段】 本発明の光学特性可変光学素子は、1対の部材により形成される空間に液晶を封入し、外部からの物理的作用により前記液晶の液晶分子の配向状態を制御し、前記液晶の光学特性を変化させる光学特性可変光学素子において、前記液晶が前記液晶を透過する光の波長に比べて小さい捻れピッチを持って構成される。

【0012】 本発明の光学特性可変光学素子では、前記液晶が前記液晶を透過する光の波長に比べて小さい捻れピッチを持たせて構成することで、構造が簡単で、光量損出が少なく低電圧により駆動可能でボケが生じることなく、光学特性を変化させることを可能とする。

## 【0013】

【発明の実施の形態】 以下、図面を参照しながら本発明の実施の形態について述べる。

40 【0014】 図1ないし図17は本発明の第1の実施の形態に係わり、図1は可変焦点レンズの基本構成を示す構成図、図2は図1のカイラルネマチック液晶の分子の屈折率楕円体を示す図、図3は図1の可変焦点レンズの作用を説明する説明図、図4は図1の可変焦点レンズの具体的な構成を示す構成図、図5は図1の可変焦点レンズの第1の変形例に用いられるカイラルスメクチック液晶のカイラルスメクチックC相の液晶分子配列を示す図、図6は図5のカイラルスメクチック液晶を用いた可変焦点レンズの構成を示す構成図、図7は図6の可変焦点レンズの作用を説明する説明図、図8はカイラルコレ

ステリック液晶を用いた図1の可変焦点レンズの第2の変形例の構成を示す構成図、図9は図8の可変焦点レンズの作用を説明する説明図、図10は図8のカイラルコレステリック液晶の反射率の実測値を示す図、図11はディスコチック液晶を用いた図1の可変焦点レンズの第2の変形例の構成を示す構成図、図12は図11の可変焦点レンズの作用を説明する説明図、図13は図11のディスコチック液晶の分子の屈折率楕円体を示す図、図14は図12のディスコチック液晶をZ方向から見た時の第1の図、図15は図12のディスコチック液晶をZ方向から見た時の第2の図、図16は図1のカイラルネマテック液晶の配向を変化させるのに磁場を用いた可変焦点レンズの構成を示す構成図、図17は図1のカイラルネマテック液晶の配向を変化させるのに温度変化を用いた可変焦点レンズの構成を示す構成図である。

【0015】図1に示すように、第1の実施の形態の光学特性可変光学素子としての可変焦点レンズ1は、カイラルネマテック液晶2を、内側に透明電極膜3をそれぞれ被膜させた平板ガラス4とレンズ5との間に配向膜6を介して挟み、シール材7により封止した構成が基本構成となっており、カイラルネマテック液晶2の振れのピッチPは、光の波長λに比べて非常に小さいものとする。つまり、

$$【数1】 P \ll \lambda \quad (1)$$

\*

$$W_t = e^{-i\alpha} R(-\Phi) \begin{pmatrix} \cos X - i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} & \Phi \frac{\sin X}{X} \\ -\Phi \frac{\sin X}{X} & \cos X + i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} \end{pmatrix} \quad (3)$$

で与えられる。ただし、

【数4】

$$\Phi = \frac{2\pi d}{P} \quad (4)$$

【数5】

$$\Gamma = 2\pi(n_e - n_o) \frac{d}{\lambda} \quad (5)$$

【数6】

$$\alpha = 2\pi \frac{(n_e + n_o)}{2} \frac{d}{\lambda} \quad (6)$$

【数7】

$$X = \sqrt{\Phi^2 + \frac{\Gamma^2}{2}} \quad (7)$$

【数8】

$$R(-\Phi) = \begin{pmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi \\ \sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \quad (8)$$

である。

【0019】ここで、常光を液晶分子の短軸方向の偏光と定義し、異常光を液晶分子の長軸方向の偏光、又は、長軸を光軸に垂直な平面へ投影した時の方向の偏光と定

\*である。このように、ピッチPが光の波長λに比べて非常に小さいと、レンズ5は入射光の偏光によらず、屈折率n'をもつレンズとして作用する。

【0016】

【数2】

$$n' = \frac{n_e + n_o}{2} \quad (2)$$

ここで、neは液晶分子長軸方向の偏光に対する屈折率noは液晶分子短軸方向の偏光に対する屈折率

10であり、図2にカイラルネマテック液晶2の入射側の液晶分子に対応する屈折率楕円体を示す。ここで、x軸及びz軸は、液晶分子の短軸方向、y軸は液晶分子の長軸方向になっている。なお、ne>noとする。

【0017】次に、ジョーンズのベクトルと行列によって、なぜ、本実施の形態のカイラルネマテック液晶2が実効的に屈折率n'の等方的な媒質としてふるまうのかを、以下に説明する。

【0018】上記文献1のP85~92、に示される、式3.107と式3.110及び式3.126によれば、絶対的な位相の変化exp(-iα)を含めた時、図1に示した厚さdのカイラルネマテック液晶2に対するジョーンズの行列Wtは、

【数3】

30義すると、Γはカイラルネマテック液晶2による常光と異常光の位相差を表わす。

【0020】なお、Φはカイラルネマテック液晶2の液晶分子の振れ角をラジアンで表わしたものである。また、式(3)、式(8)の座標系は、図1に示すx、y、z軸のように取るものとする。つまり、x軸は紙面の表から裏側へ向っており、y軸はカイラルネマテック液晶2の入射面での液晶分子長軸の方向である。

【0021】さて、式(1)の条件のもとで、式(3)のWtがどのようなになるかを調べてみる。

【0022】まず、式(1)は、

40 【数9】

$$0 < \frac{P}{\lambda} \ll 1 \quad (9)$$

と変形できる。そこで、P/λ→0の時、式(3)のWtの極限值WtLを求めてみる。

【0023】

【数10】

$$\frac{\Gamma}{\Phi} = 2\pi(n_e - n_o) \frac{P}{\lambda} \quad (10)$$

であるから、P/λ<<1のとき

50 【数11】

$$\left| \frac{\Gamma}{\Phi} \right| \ll 1 \quad (11)$$

となり、 $P/\lambda \rightarrow 0$  のとき  $|\Gamma/\Phi| \rightarrow 0$  となる。

【0024】式(11)の条件のもとで

【数12】

$$X = \Phi \sqrt{1 + \frac{\Gamma^2}{2\Phi^2}} \approx \Phi + \frac{\Gamma^2}{4\Phi} \quad (12)$$

【数13】

$$\cos X \approx \cos\left(\Phi + \frac{\Gamma^2}{4\Phi}\right) \quad (13)$$

【数14】

$$\frac{\Gamma \sin X}{2} \approx \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin\left(\Phi + \frac{\Gamma^2}{4\Phi}\right)}{\Phi + \frac{\Gamma^2}{4\Phi}} \quad (14)$$

\* 【数15】

$$\Phi \frac{\sin X}{X} \approx \frac{\sin\left(\Phi + \frac{\Gamma^2}{4\Phi}\right)}{1 + \frac{\Gamma^2}{4\Phi^2}} \quad (15)$$

と近似でき、 $P/\lambda \rightarrow 0$  のとき、それぞれ、

$$\text{【数16】 } X \rightarrow \Phi \quad (16)$$

$$\text{【数17】 } \cos X \rightarrow \cos \Phi \quad (17)$$

10 【数18】

$$\frac{\Gamma \sin X}{2} \frac{X}{X} \rightarrow 0 \quad (18)$$

【数19】

$$\Phi \frac{\sin X}{X} \rightarrow \sin \Phi \quad (19)$$

となるので、 $P/\lambda \rightarrow 0$  のとき

【数20】

\*

$$W_{LL} \rightarrow e^{-i\alpha} R(-\Phi) \begin{pmatrix} \cos \Phi & \sin \Phi \\ -\sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} = e^{-i\alpha} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

となる。これは屈折率  $n' = (n_e + n_o) / 2$ 、厚さ  $d$  の、光軸に沿って等方な媒質のジョーンズ行列にほかならない。

【0025】従って、 $P/\lambda \ll 1$  であるので、図1の可変焦点レンズ1は、屈折率  $n'$  のレンズとして作用し、ボケのない結像が実現できる。

【0026】また、図1の可変焦点レンズ1において、交流電源8をスイッチ9によりONにし、配向膜6間に電場を与えると、カイラルネマチック液晶2は、図3の 30 ように配列し、液晶は屈折率  $n_o$  の等方媒質となるので、図1の状態と比べて、焦点距離の異なる液晶レンズとなり、ボケのない可変焦点レンズが実現できるのである。

【0027】次に、上記の可変焦点レンズ1の具体的な構成例を図4を用いて説明する。図4に示すように、可変焦点レンズ1は、具体的には、可変抵抗21により電圧を連続的に可変にした構成になり、液晶分子の配列を、上記の図1と図3の中間にもってこることができるように構成する。これにより、焦点距離が連続的に変化 40 する液晶レンズを実現できる。

※ 【数21】

$$\cos X - i \frac{\Gamma \sin X}{2} \frac{X}{X} \approx \cos\left(\Phi + \frac{\Gamma \Gamma}{4 \Phi}\right) - i \frac{\Gamma}{2\Phi} \sin\left(\Phi + \frac{\Gamma \Gamma}{4 \Phi}\right) \quad (21)$$

【数22】

$$\Phi \frac{\sin X}{X} \approx \sin\left(\Phi + \frac{\Gamma \Gamma}{4 \Phi}\right) \quad (22)$$

となり

【数23】

※ 【0028】なお、図4のような中間の配列の場合においても、 $n_e$ の値を、 $n_e$ と $n_o$ のある中間の値である異常光の屈折率  $n_e'$  で置きかえることで、上記の式(3)～式(20)は満たされる。

【0029】なお、図4のように構成することで、電圧の印加のしかたとしては、連続可変に限らず、いくつかの離散的な電圧値から印加電圧を選択するようにしても、可変焦点レンズが実現できる。

【0030】ここで、図4のように構成した可変焦点レンズ1の実際的な例について、詳細に説明する。

【0031】式(20)には  $P/\lambda \rightarrow 0$  の極限の場合が示されているが、実際の液晶レンズ、可変焦点レンズでは必ずしも極限值があてはまらない場合もあるので、式(3)の近似式を導いてみる。

【0032】式(3)を  $P/\lambda$  の1次までを考えて近似すると、次のようになる。つまり、式(12)～式(14)で、 $P/\lambda$  の1次まで、すなわち式(10)より、 $\Gamma/\Phi$  の1次までを残し  $P/\lambda$  の2次以上、 $\Gamma/\Phi$  の2次以上を省略すると、

$$W_i \rightarrow e^{-i\alpha} R(-\Phi) \begin{pmatrix} \cos(\Phi + \frac{\Gamma}{4}\frac{\Gamma}{\Phi}) - i \frac{\Gamma}{2\Phi} \sin(\Phi + \frac{\Gamma}{4}\frac{\Gamma}{\Phi}) & \sin(\Phi + \frac{\Gamma}{4}\frac{\Gamma}{\Phi}) \\ -\sin(\Phi + \frac{\Gamma}{4}\frac{\Gamma}{\Phi}) & \cos(\Phi + \frac{\Gamma}{4}\frac{\Gamma}{\Phi}) + i \frac{\Gamma}{2\Phi} \sin(\Phi + \frac{\Gamma}{4}\frac{\Gamma}{\Phi}) \end{pmatrix} \\ = W_{in} \quad (23)$$

を得る。従って、 $W_{in}$ の値が等方媒質のジョーンズ行列とほぼ等しいと見なせるためには、 $|i \cdot \Gamma / 2\Phi|$ が0に近ければよい。この時 $W_{in}$ は、

【数24】

$$e^{-i\alpha} \begin{pmatrix} \cos(\frac{\Gamma}{4}\frac{\Gamma}{\Phi}) & \sin(\frac{\Gamma}{4}\frac{\Gamma}{\Phi}) \\ -\sin(\frac{\Gamma}{4}\frac{\Gamma}{\Phi}) & \cos(\frac{\Gamma}{4}\frac{\Gamma}{\Phi}) \end{pmatrix} \quad (24)$$

に近づくが、この式は、液晶が入射光の偏光方向は $\Gamma/4 \cdot \Gamma/\Phi$ だけ回転するが、等方媒質であると思わせることを意味している。

【0033】

【数25】

$$|i \frac{\Gamma}{2\Phi}| \approx 0 \quad (25)$$

つまり、

【数26】

$$|\frac{\Gamma}{2\Phi}| \ll 1 \quad (26)$$

であれば、ボケのない可変焦点レンズが得られる。式(10)より

【数27】

$$\frac{\Gamma}{2\Phi} = \pi(n_e - n_o) \frac{P}{\lambda} \quad (27)$$

となる。

【0034】実際のレンズ付撮像装置、例えば電子カメラ、VTRカメラ、電子内視鏡などの、比較的低コストの製品等のレンズに本発明の可変焦点レンズを用いる場合、固体撮像素子の画素数が少なく、高解像を要求しない場合もあるので、式(26)は条件をゆるめることができ、

【数28】

$$|\frac{\Gamma}{2\Phi}| < 1 \quad (28)$$

であれば良い。

【0035】画素数の多い電子撮像装置のレンズ、フィルムカメラ、顕微鏡などの高画質の製品等のレンズでは高解像が要求されるので、

【数29】

$$|\frac{\Gamma}{2\Phi}| < \frac{\pi}{6} \quad (29)$$

であればよい。

【0036】光ディスクのレンズ等結像に用いないレンズの場合、条件はさらにゆるめられ、

【数30】

$$|\frac{\Gamma}{2\Phi}| < \frac{\pi}{2} \quad (30)$$

10 であればよい。

【0037】なお、本実施の形態に共通して言えることであるが、液晶がらせん状の配列の時、液晶分子の長軸方向が光軸に対して垂直でない時、つまり斜めの時は、式(1)、式(26)～式(30)の $n_e$ を上記の $n_e'$ で置きかえればよい。

【0038】以下に、いくつかの設計例を上げる。

【0039】カイラルネマチック液晶2の厚さ $d$ は、薄いとレンズのパワーが弱く役に立たないし、厚いと光を散乱、フレアの原因となるので、

20 【数31】  $2\mu < d < 300\mu$  (31)

ぐらいが適当である。光の波長 $\lambda$ の例としては可視光を考えれば、

【数32】  $0.35\mu < \lambda < 0.7\mu$  (32)

である。

【0040】 $n_e - n_o$ の値は液晶の物性で決まるが、

【数33】

$0.01 < |n_e - n_o| < 0.4$  (33)

ぐらいの物質が多い。そこで、第1の設計例として、

$d = 15\mu$

30  $\lambda = 0.5\mu$

$n_e - n_o = 0.2$

$P = 0.05\mu$

とすれば、

$\Gamma/2\Phi = \pi \cdot 0.2 \times 0.05 / 0.5 = 0.02\pi$

となり、式(26)、式(28)、式(29)、式(30)を満たす。

【0041】第2の設計例として、

$d = 30\mu$

$\lambda = 0.6\mu$

40  $n_e - n_o = 0.25$

$P = 0.3\mu$

とすれば、

$\Gamma/2\Phi = \pi \cdot 0.3 \times 0.25 / 0.6 = 0.125\pi$

となり、式(26)、式(28)、式(29)、式(30)を満たす。

【0042】また、第3の設計例として

$d = 50\mu$

$\lambda = 0.55\mu$

50  $n_e - n_o = 0.2$

$$P = 0.6 \mu$$

とすれば、

$$\Gamma / 2\Phi = \pi \cdot 0.2 \times 0.6 / 0.55 = 0.218\pi$$

となり、式(28)、式(30)を満たす。

【0043】さらに、第4の設計例として、近赤外光用の可変焦点レンズを考え、

$$d = 200 \mu$$

$$\lambda = 0.95 \mu$$

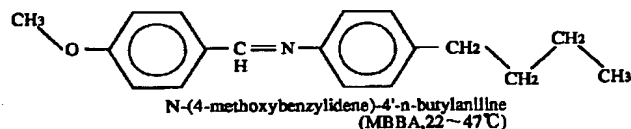
$$n_e - n_o = 0.2$$

$$P = 0.7 \mu$$

とすれば

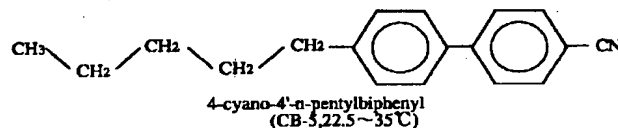
$$\Gamma / 2\Phi = \pi \cdot 0.2 \times 0.7 / 0.95 = 0.1458\pi$$

\*



化学式(1)

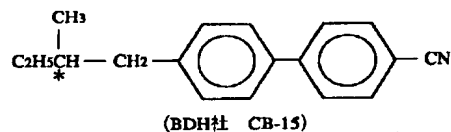
【化2】



化学式(2)

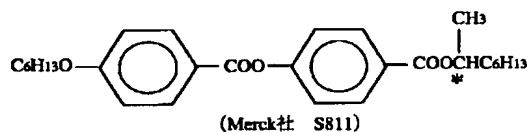
【化3】

※ ※  
30



化学式(3)

【化4】



化学式(4)

以上の説明において、可変焦点レンズ1に用いる液晶としては、カイラルネマチック液晶2を用いて説明したが、本実施の形態はこれに限らず、可変焦点レンズの第1の変形例として、図5に示ようなカイラルスメクチック液晶31を用いて構成することができる。この図5は、カイラルスメクチックC相の液晶分子配列を示したもので、これを用いた可変焦点レンズ1aの構造を図6に示す。

【0047】図6に示すように、カイラルスメクチック

\*となり、式(26)、式(28)、式(29)、式(30)を満たす。

【0044】以上の各設計例では、カイラルネマチック液晶を例にとりて説明したが、カイラルネマチック液晶のらせんのピッチを、用いる光の波長よりも小さくするためには、カイラル剤を液晶に混ぜると良い。

【0045】カイラル剤としては、コレステリック液晶又は合成品の光学活性化合物などが用いられる。以下の化学式(1)、化学式(2)にカイラルネマチック液晶の例を、化学式(3)、化学式(4)にカイラル剤の例を示す。

【0046】

【化1】

液晶31では、電圧を加えない場合には液晶分子は各層31-aごとに特定の方向を向き、その方向が一定の周期Pで回転している。

【0048】これに電圧を印加すると、各層の液晶分子は、図7のように、座標系のZ軸方向に配列し、カイラルスメクチック液晶31の屈折率は、図6の状態のn'から、noに低下し、可変焦点レンズ1の焦点距離が変化する。

【0049】この図5~7に示した第1の変形例につい

ても、式(1)～式(30)はあてはまり、特に式(26)、式(28)、式(29)、式(30)を満たせばケの少ない可変焦点レンズが得られる。また、図6の構成においても、カイラルスメクチック液晶31に加わる電圧は連続的に変えることができ、それに伴って焦点距離も連続的に変る。

【0050】ここで、カイラルスメクチック液晶31を用いた可変焦点レンズ1aの設計例を示すと、パラメータとして、

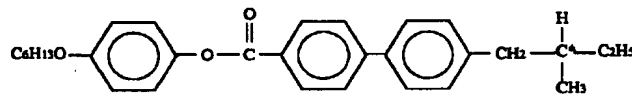
$$d = 25 \mu$$

$$\lambda = 0.55 \mu$$

$$n_e - n_o = 0.3$$

$$P = 0.1 \mu$$

\*



4-(n-ヘキシルオキシ)フェニルオキシ-4'-(2-メチルブチル)ビフェニル-4'-カルボキシレート

化学式(5)

また、可変焦点レンズの第2の変形例として、図8に示ように、カイラルコレステリック液晶41を用いた可変焦点レンズ1bを構成することができる。

【0053】カイラルコレステリック液晶41では、液晶分子の配向方向は各層でレンズ表面に平行で方位角が周期Pで、Z軸方向にらせんを描いて変る。この状態で式(1)～式(30)があてはまる。

【0054】電圧が加わると、液晶分子の配向が図9のようにらせんが無くなり、焦点距離が変化する。

【0055】なお、カイラルコレステリック液晶には選択反射の性質があり、波長 $\lambda_s = P n'$ 近傍の右または左の円偏光を全反射してしまう。図10は、自然偏光に対するカイラルコレステリック液晶の反射率の実測値の例を示している。

【0056】従って、波長 $\lambda_s$ は、可変焦点レンズ1bで用いる光の波長範囲外にあることが望ましい。つまり、 $P n'$ が、可変焦点レンズ1bを利用する光の波長域外にあることが、さらに透過率の良い、着色のない液晶レンズを得るために必要である。

【0057】可視光であれば、

$$【数34】 P n' < 0.4 \mu \quad (34)$$

であることが必要である。

\*とすると、

$$\Gamma / 2\Phi = \pi \cdot 0.3 \times 0.1 / 0.55 = 0.0545\pi$$

となり、式(26)、式(28)、式(29)、式(30)を満たす。

【0051】なお、化学式(5)に、スメクチック液晶31の分子構造の1例である「4-(n-ヘキシルオキシ)フェニルオキシ-4'-(2-メチルブチル)ビフェニル-4'-カルボキシレート」を示した。なお、ピッチPはおおよそ $0.2 \mu$ である。

【0052】

【化5】

【0058】なお、上述した第1の変形例である図5のカイラルスメチックC相の液晶でも選択反射は生じる場合があり、上記の理由で式(34)は図5の例にも適用される。

【0059】カイラルコレステリック液晶41を用いた可変焦点レンズ1bの設計例として、

$$d = 15 \mu$$

$$n_e - n_o = 0.4$$

$$\lambda = 0.45 \mu$$

$$P = 0.01 \mu$$

$$n' = 1.7$$

とすると、

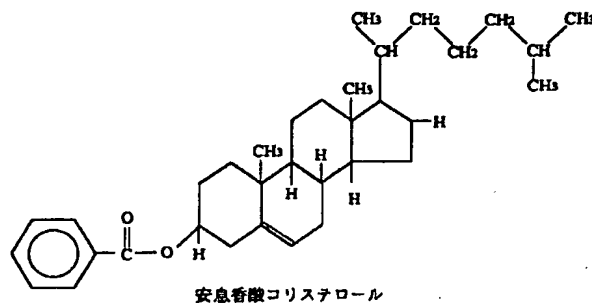
$$\Gamma / 2\Phi = \pi \cdot 0.4 \times 0.01 / 0.45 = 0.0089\pi$$

となり、式(26)、式(28)、式(29)、式(30)を満たし、 $P n' = 0.017 \mu$ であるから、式(34)も満たしている。

【0060】化学式(6)はカイラルコレステリック液晶の1例で、安息香酸コレステロールの化学式である。

【0061】

【化6】



化学式 (6)

また、可変焦点レンズの第3の変形例として、図11に示ように、ディスコチック液晶51を用いてもよく、電圧が加わると、図12のようにディスコチック液晶51の配向が変り、凸レンズとしての焦点距離が長くなる。つまり、ディスコチック液晶51は、図13に示す屈折率楕円体のように、負の1軸性結晶であるので、凸レンズとしての焦点距離が長くなるのである。

【0062】なお、この場合、図12をZ方向から見た時、ディスコチック液晶51の分子の配列が図14又は図15のように一つの方向を向いていないならば、図12の状態、液晶の配列はらせんを描かなくてもよい。従って、式(1)～式(30)は満たなくてもよい。

【0063】本実施の形態並びに各変形例及び後述する他の実施の形態で述べる可変焦点レンズに共通して言えることであるが、らせんのピッチPが、用いる光の波長λに比べて小さいことが、ボケのより少ない可変焦点レンズを得るためにより望ましいことであり、たとえば可視光の場合、 $0.4\mu < \lambda < 0.7\mu$  で使用する光学装置では、

【数35】

$$0.0001\mu < P < 0.4\mu \quad (35)$$

が望ましい条件となる。さらに充分ボケを減らすためには

【数36】

$$0.0001\mu < P \leq 0.2\mu \quad (36)$$

であることが望まれる。Pの下限は液晶分子自体の大きさから決っている。

【0064】また、本実施の形態並びに各変形例では、各液晶の配向を変化させるのに、電場を用いてきたが、これに限らず、図16に示すように、コイル55及び鉄芯56を用いて、例えばカイラルコレステリック液晶41に磁場Hを印加し、これを変化させても良い。なお、図16はカイラルコレステリック液晶41の可変焦点レンズの例であるが、カイラルネマチック液晶2あるいはカイラルスメクチック液晶31の可変焦点レンズに適用してもよい。

【0065】また、各液晶の配向を変化させるのに、図17に示すように、ヒータ58を用いて温度の変化によ

って、例えばカイラルコレステリック液晶41の配向を変えるようにしてもよく、これまで述べた他の液晶、カイラルネマチック液晶2あるいはカイラルスメクチック液晶31等の可変焦点レンズにも適用できる。この構成では、温度を変えることによって、液晶に相転移を生じさせ、レンズの焦点距離を変えるようになっている。なお、レンズをフレネルレンズ60として、液晶の厚さを増加させずに、可変焦点レンズのパワーをかせいでいる。ここで、フレネルレンズ60及びレンズ5は用途に応じ非球面形状としても良い。

【0066】図18は本発明の第2の実施の形態に係る可変焦点レンズの構成を示す構成図である。

【0067】第2の実施の形態は、第1の実施の形態とほとんど同じであるので、異なる点のみ説明し、同一の構成には同じ符号をつけ説明は省略する。

【0068】第2の実施の形態は、回折光学素子(DOEあるいはHOEとも呼ばれる)を液晶で作り、可変焦点レンズとしたものである。

【0069】図18に示すように、第2の実施の形態の可変焦点レンズ61は、カイラルネマチック液晶2を、内側に透明電極膜3をそれぞれ被膜させたレンズ62と平行ガラス63との間に配向膜6を介して挟み、シール材7により封止した構成となっている。

【0070】レンズ62はフレネルレンズ状であるが、凹凸部は光の波長のレベルで、レンズ62のひとつの輪帯の巾Wは、

$$【数37】 W \cdot \theta = m \cdot \lambda \quad (37)$$

で決る。ここで、θはその輪帯での光線の屈折角、mは回折次数である。

【0071】カイラルネマチック液晶2の屈折率を電圧の印加によって変えると、回折の次数が変わるので、不連続的に可変焦点レンズ61の焦点距離を変えることができる。

【0072】つまり、ある輪帯のギザギザの高さをhとし、レンズ62の屈折率をngとすれば、

【数38】

$$0.25 \cdot \frac{m_1 \lambda}{n' - n_g} < h < 5 \cdot \frac{m_1 \lambda}{n' - n_g} \quad (38)$$

【数39】

$$0.25 \cdot \frac{m_2 \lambda}{n_0 - n_g} < h < 5 \cdot \frac{m_2 \lambda}{n_0 - n_g} \quad (39)$$

【数40】  $m_1 \neq m_2$  (40)

となる。

【0073】ただし、 $m_1$ 、 $m_2$ は互いに異なる整数と  
おく時、 $h$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $n'$ 、 $n_0$ 、 $n_g$ が式(38)  
～式(40)を満たすならば、可変焦点レンズ61は、次  
数 $m_1$ と $m_2$ とで回折効率の最適化された回折光学素子  
となる。

【0074】焦点距離は、スイッチ9のON、OFFに  
より、 $f_1/m_1$ 、 $f_1/m_2$ にかわる。ここで $f_1$   
は、1次の回折光学素子の焦点距離である。なお、実用  
的には式(38)、式(39)は近似的に満たされていれ  
ばよい。

【0075】以下に、上記の各実施の形態及びその各変  
形例の応用例について説明する。

【0076】図19に示すように、上記の各実施の形態  
及びその各変形例の可変焦点レンズを用いた第1の装置  
としての電子内視鏡71は、被写体に照射する照明光を  
伝送するライトガイド72からの照明光を照明レンズ7  
3により被写体に照射し、被写体像を対物レンズ74を  
介して入射する。そして、可変焦点レンズ75を絞り7  
6近傍に配置し、光学レンズ77によりCCD78の結  
像面に結像させ、信号処理装置79により信号処理しモ  
ニタ80に被写体像を表示させる構成となっている。こ  
の構成では、可変焦点レンズ75は、ピント調整のため  
に用いられ、オートフォーカス機能を備えた電子内視鏡  
を実現している。

【0077】また、上記の実施の形態及びその各変形例  
の可変焦点レンズを用いた第2の装置は、図20に示す  
ように、対物レンズ81によりCCD82が被写体像を  
撮像し、信号処理装置83で信号処理しモニタ84に被  
写体像を表示させる撮像装置89であって、対物レンズ  
81とCCD83との間に絞り88を介して2つの可変  
焦点レンズ85、86を設け、この焦点距離を連動して  
変化させることによりズーミングと、ピント合せの両方  
を実現するものである。これらは実際には電子カメラ、  
TVカメラ等に用いられ、可変焦点レンズ85、86の  
駆動は制御回路87によってピントを合せつつ、ズーミ  
ングするよう行われる。

【0078】なお、図20では可変焦点レンズ85、8  
6は、それぞれ凹、凸レンズの場合を示しているが、凸  
凸、又は凸凹、凹凹のレンズの組合わせでもよい。

【0079】図21は、式(1)を満たす液晶の別の応用  
例で、光学系の絞り91に用いた例である。

【0080】この絞り91は、式(1)を満たす液晶であ  
るカイラルネマチック液晶2を封止する透明な材質から  
なる透明部材92、93により挟まれた構造になってい  
て、透明部材93は液晶に接する部分の断面形状がのこ  
切り状または3角になっている。また、絞り91は光軸  
に対して回転対称な形状である。

【0081】図21において、左右から絞り91の中心  
に入射した光線aはそのまま通過するが、周辺部に入射  
した光線bはカイラルネマチック液晶2と透明部材93  
との境界面で全反射して側方に曲げられ、絞り91を透  
過することができず、絞り91を絞った状態である。

【0082】図22は、絞り91に電圧を加えた状態  
で、カイラルネマチック液晶2はホメオトロピック配向  
になるので、光線bは透明部材93とカイラルネマチッ  
ク液晶2との境界面で全反射することなく直進し、図2  
1に比べ絞りの有効径が広がった状態にある。なお、透  
明部材93の屈折率を $n_{93}$ とする時

【数41】

$$0.8 n_0 < n_{93} < 1.3 n_0 \quad (41)$$

であれば、図22の状態では光線bはほぼ直進する。

【0083】図21の状態では光線aが全反射するための  
条件は、図示の角を $\beta$ とすると、

【数42】

$$\sin(90^\circ - \beta) > \frac{n_{93}}{n'} \quad (42)$$

である。

【0084】また、カイラルネマチック液晶2は式  
(1)のかわりに、実用的には式(26)又は式(2  
8)又は式(29)又は式(30)を満たせばよい。

【0085】なお、液晶としては、カイラルネマチック  
液晶2以外に、上述したカイラルスメクチック液晶3  
1、カイラルコレテリック液晶41、ディスクチック液  
晶51、さらには高分子中に液晶を分散させた高分子分  
散液晶やポリマー液晶等も用いることができる。カイラ  
ルスメクチック液晶31又はカイラルコレテリック液晶  
41の場合には、式(34)も満たすとなお良い。また、  
どの液晶にも共通していえるが、式(35)、式(3  
6)も満たすとさらに良い。

【0086】図23はカイラルネマチック液晶2を用い  
た第2の絞り101の例である。図21の絞り91と異  
なるのは、透明部材93に代わる透明部材102の周辺  
がDOE(回折光学素子)になっていることで、透明部  
材102の周辺は、高さが使用する光の波長 $\lambda$ 程度の、  
のこぎり刃形状をしていることである。

【0087】図23の状態では

$$\text{【数43】 } n_0 < n_{102} \quad (43)$$

なので、周辺部の光b1、b2は外側へ回折によって曲  
げ、光吸収性物質103で吸収され絞り101より後方  
へは伝送されない。なお、 $n_{102}$ は透明部材102の屈  
折率である。



【0088】図23は電圧をOFFにした時の状態であるため液晶がカイラルネマチックの配列で

【数44】

$$0.9n' < n_{102} < 1.2n' \quad (44)$$

であるため、b1、b2はおおよそ直進し、実質的に絞りが開いた状態として動作する。

【0089】DOEの形状としては、式(37)で屈折角 $\theta$ が決まり、回折効率を上げて、絞りとしての動作をさらに向上させるためには、式(38)～式(40)を満たすとなお良い(ただし、ngを $n_{102}$ で置き換える)。

【0090】液晶としては、カイラルネマチック液晶2以外に、上述したカイラルスメクチック液晶31、カイラルコレステリック液晶41、ディスクチック液晶51、さらには高分子中に液晶を分散させた高分子分散液晶やポリマー液晶等も用いることができる。カイラルスメクチック液晶31又はカイラルコレステリック液晶41の場合には、式(34)も満たすとなお良い。

【0091】液晶は式(1)をみたす必要があるが、実用的には式(1)のかわりに、式(26)又は式(28)又は式(29)又は式(30)を満たせばよい。

【0092】また、透明部材92もDOEとすれば、より大きな屈折角が得られ、絞りとして高性能のものが得られる。

【0093】なお、絞り101に加える電圧は連続的に可変できるようにしてもよく、その場合、絞り101の周辺部の透過率が連続的に変化する絞りとなり便利である。

【0094】上記の絞り91、101は、図19の電子内視鏡71の絞り76や図20の撮像装置80の絞り88等に用いることができる。電子内視鏡71や撮像装置80では必ず、電源が含まれるため、その電源を液晶素子用にも用いることができるので好都合である。

【0095】また、絞り101に於て、透明部材102の中央のA部を無しにして、全面のこぎり刃状の形状にすれば、光束径は変わらないが、光量を変化させることのできる絞りが得られる。透過光量可変な光学素子と類似の効果を持たせる場合には式(38)又は式(39)の一方は近似的に満たされるのが良く、式(38)と式(39)とが同時に満たされない方が良い(なお、式(40)は満たす必要がある)。

【0096】なぜならば、たとえば式(38)が完全にみたされ、式(39)が不完全であるなら、次数 $m_1$ の光は図23、24のいずれの状態でも光量は異なるが、存在するので、次式 $m_1$ の光に対して絞り101は濃度可変フィルタとして動作するのである。

【0097】また、式(38)、式(39)が両方みたされる場合には、次式 $m_1$ 又は $m_2$ の光に対して、絞り101は光シャッタとして動作することになる。この場合でも図23から図24の状態に連続的に電圧を変えて

行けば、式(38)、式(39)の中の $ne$ は連続的に変化する $ne'$ で置き換えられるので、透過光量可変な光学素子として動作させることができる(なお、式(2)を考慮する必要がある)。

【0098】図25は式(1)、式(26)、式(28)、式(29)、式(30)のいずれかを満たす液晶を用いた可変プリズム(あるいは可変光偏向器)111の一例である。

【0099】この可変プリズム111では、図25に示すように、クサビ状あるいはのこぎり刃状の透明部材112と透明部材113の間にカイラルネマチック液晶2が配置されている。たとえば、透明部材112の屈折率をカイラルネマチック液晶2の屈折率 $n'$ と等しくしておけば、図25の左右からの光は直進する。

【0100】ここで電圧を可変プリズム111に加えると、図26のように液晶の配列はホメオトロピックになり、カイラルネマチック液晶2の屈折率が $n_0$ に下るので、光は右上方へ屈折される。なお、電圧を連続可変にすれば光の屈折角が連続的に変わるので便利である。

【0101】液晶としては、カイラルネマチック液晶2以外に、上述したカイラルスメクチック液晶31、カイラルコレステリック液晶41、ディスクチック液晶51、さらには高分子中に液晶を分散させた高分子分散液晶やポリマー液晶等も用いることができる。カイラルスメクチック液晶31又はカイラルコレステリック液晶41の場合には、式(34)も満たすとなお良い。

【0102】のこぎり刃の形をこまかくして透明部材112を回折光学素子としても可変プリズムが得られる。この時、式(37)を満たすように、さらに式(38)、式(39)、式(40)を満たせば、絞りの効果の高い、光学素子が得られる(ただし、このときngは透明部材112の屈折率を表わす)。

【0103】この可変プリズム111は、ブレ防止用に、電子カメラ、TVカメラ、フィルムカメラ、双眼鏡等に用いることができる。

【0104】ところで、上記の絞り91、101及び可変プリズム111で用いた光線の空間変調の原理は、ディスプレイにも用いることができる。

【0105】図27は、式(1)又は式(26)、式(28)、式(29)、式(30)のいずれかを満たす液晶を用いたディスプレイ121の例である。

【0106】このディスプレイ121では、図27に示すように、のこぎり刃状の形をした断面を持つ透明部材122と、透明部材123の間に液晶124が配置されている。透明部材122の屈折率はほぼ $n'$ に等しいとする。液晶124は、個別電極125により所望の画素に可変電圧が印加されるようになっており、ランプ126の光がカラーフィルタ127を介して、透明部材123、液晶124、透明部材122と順次透過するようになってい

【0107】このように構成したディスプレイ121においては、例えば、Aの画素のように電圧のかかっていない画素では、液晶124の配列はツイストネマチック配向なので、ランプ125の光は直進するので、画素は明るく見える。

【0108】また、Bの画素のように高い電圧がかかっている画素では、液晶124の配列はホメオトロピックになるので、ランプ125の光は透明部材122によって強く屈折され、人の眼には暗くみえる。

【0109】Cの画素のように中間の電圧を加えると、ランプ125の光はAとBとの中間に屈折されるので、人の眼にはやや明るくみえる。通常のディスプレイのように偏光板を使用しないので明るいのが特徴である。

【0110】図28はランプ125のかわりに反射板131を用いた反射型のディスプレイ130の例である。

【0111】反射型のディスプレイ130では、図28に示すように、画素Aのように電圧のかかっていない画素では入射光は反射されて明るく見える。また、画素Bでは電圧が印加されているため、入射光は屈折され、やがて吸収、散乱され暗くみえる。画素Cではその中間となる。

【0112】これらの光の屈折力を可変するディスプレイの他、画素の明暗を実現するのに、上述した絞り91のように全反射を用いるタイプ、絞り101のように回折光学素子を用いるタイプも考えられる。

【0113】以上のディスプレイの例では用いる液晶は、カイラルネマチック液晶2以外に、カイラルスメクチック液晶31、カイラルコレステリック液晶41、ディスコチック液晶51、さらには高分子中に液晶を分散させた高分子分散液晶やポリマー液晶等も用いることができる。

【0114】ディスプレイに用いる液晶は式(1)、式(26)、式(28)、式(29)、式(30)いずれかを満たすと良い。カイラルスメクチック液晶31又はカイラルコレステリック液晶41の場合には、式(34)も満たすとなお良い。

【0115】以上述べた液晶を用いた、絞り回折光学素子、プリズム、表示装置に於て、用いられる光の波長が可視光の場合、式(35)又は式(36)を満たすことで、より高性能のものが得られる。

【0116】なお、上記各実施の形態で用いる液晶に、赤外線を吸収する物質をまぜて、赤外カットフィルタ効果を付与すると、可視光で用いる電子撮像系に用いる場合、赤外カットフィルタが省略でき、コスト低減、スペース削減で有利である。用いる光が可視光でない撮像系の場合は、非観察光をカットする物質を液晶に混ぜればフィルタを省略でき同様の効果が出る。

【0117】上記各実施の形態での液晶を用いた可変特性を持つ光学素子においては、式(1)を満たすのが理想ではあるが、現実の製品に用いる場合には、式(1)は

必ずしも満たされなくてもよく、それほど高精度を要求しない場合には、

$$\text{【数45】 } P < \lambda \quad (45)$$

であれば良い。

【0118】また、やや高精度を望む場合には、

$$\text{【数46】 } P < \lambda / 2 \quad (46)$$

が満たされるとなお良い。

【0119】照明系、低コストの光学装置等では、

$$\text{【数47】 } P < 2\lambda \quad (47)$$

でも実用になることがある。

【0120】なお、ディスコチック液晶51を用いた場合には式(45)又は式(46)又は式(47)を満たされなくてもよい場合もある。

【0121】これまでの各実施の形態すべてについて、液晶としてはカイラルネマチック液晶2以外に、カイラルスメクチック液晶31、カイラルコレステリック液晶41、ディスコチック液晶51、さらには高分子中に液晶を分散させた高分子分散液晶やポリマー液晶等も用いることができる。

【0122】【付記】

(付記項1) 1対の部材により形成される空間に液晶を封入し、外部からの物理的作用により前記液晶の液晶分子の配向状態を制御し、前記液晶の光学特性を変化させる光学特性可変光学素子において、前記液晶は、前記液晶を透過する光の波長に比べて、小さい捻れピッチを持つことを特徴とする光学特性可変光学素子。

【0123】(付記項2) 前記光学特性可変光学素子は、前記液晶の焦点距離を可変させる可変焦点レンズであることを特徴とする付記項1に記載の光学特性可変光学素子。

【0124】(付記項3) 前記光学特性可変光学素子は、前記液晶の透過光量を可変させる絞りであることを特徴とする付記項1に記載の光学特性可変光学素子。

【0125】(付記項4) 前記光学特性可変光学素子は、前記液晶の透過光の透過方向を可変させるプリズムであることを特徴とする付記項1に記載の光学特性可変光学素子。

【0126】(付記項5) 前記1対の部材の一方が回折部材であって、前記光学特性可変光学素子は、前記液晶の焦点距離を可変させることで前記回折部材の回折効率を変化させる回折素子であることを特徴とする付記項1に記載の光学特性可変光学素子。

【0127】(付記項6) 1対の部材により形成される空間に液晶を封入し、外部からの物理的作用により前記液晶の液晶分子の配向状態を制御し、前記液晶の光学特性を変化させる光学特性可変光学素子を備えた表示装置において、前記液晶は、前記液晶を透過する光の波長に比べて、小さい捻れピッチを持つことを特徴とする表示装置。

【0128】(付記項7) 式(28)、式(29)、

式(30)、式(45)、式(46)、式(47)の少なくともひとつを満たすことを特徴とする付記項1乃至6のいずれか1つに記載の光学特性可変光学素子または表示装置。

【0129】(付記項8) 前記液晶として、カイラルネマチック液晶、カイラルコレステリック液晶、カイラルスメクチック液晶、ポリマー液晶、高分子中に液晶を分散させた物、ディスコチック液晶のいずれかを用いたことを特徴とする付記項1乃至7のいずれか1つに記載の光学特性可変光学素子または表示装置。

【0130】(付記項9)  $P \cdot n'$  が、用いる光の波長より短く、前記液晶がカイラルコレステリック液晶あるいはカイラルスメクチック液晶であることを特徴とする付記項1乃至7のいずれか1つに記載の光学特性可変光学素子または表示装置。

【0131】(付記項10) 式(35)または式(36)を満たすことを特徴とする付記項1乃至9のいずれか1つに記載の光学特性可変光学素子または表示装置。

【0132】(付記項11) 式(37)を満たす付記項6に記載の光学特性可変光学素子からなる回折光学素子。

【0133】(付記項12) 式(37)、式(38)、式(39)、式(40)を満たす付記項6に記載の光学特性可変光学素子からなる回折光学素子。

【0134】(付記項13) 式(41)または式(42)を満たす付記項3または付記項7乃至10のいずれか1つに記載の光学特性可変光学素子からなる絞り。

【0135】(付記項14) 式(37)を満たす付記項6乃至10のいずれか1つに記載の光学特性可変光学素子からなる絞り。

【0136】(付記項15) 式(37)、式(38)、式(39)、式(40)を満たす付記項6乃至10のいずれか1つに記載の光学特性可変光学素子からなる絞り。

【0137】(付記項16) 式(43)または式(44)を満たす付記項6乃至10のいずれか1つに記載の光学特性可変光学素子からなる回折光学素子。

【0138】(付記項17) ディスコチック液晶からなる特性可変の光学素子

(付記項18) 前記外部からの物理的作用は、電場、磁場、温度の少なくとも一つを変化させる作用であることを特徴とする付記項1乃至10のいずれか1つに記載の光学特性可変光学素子または表示装置。

【0139】(付記項19) 式(28)、式(29)、式(30)、式(45)、式(46)、式(47)の少なくとも1つを満たす透過光量可変な光学素子。

【0140】(付記項20) 式(38)または式(39)の少なくとも1つと、式(40)を満たす付記項19に記載の透過光量可変な光学素子。

【0141】(付記項21) 付記項1から20の光学素子を用いた電子撮像装置。

【0142】(付記項22) 付記項6から10の光学素子を用いた反射型表示装置。

【0143】

【発明の効果】以上説明したように本発明の光学特性可変光学素子によれば、液晶が液晶を透過する光の波長に比べて小さい捻れピッチを持っているので、構造が簡単で、光量損出が少なく低電圧により駆動可能でボケが生じることなく、光学特性を変化させることができるという効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態に係る可変焦点レンズの基本構成を示す構成図

【図2】図1のカイラルネマチック液晶の分子の屈折率楕円体を示す図

【図3】図1の可変焦点レンズの作用を説明する説明図

【図4】図1の可変焦点レンズの具体的な構成を示す構成図

【図5】図1の可変焦点レンズの第1の変形例に用いられるカイラルスメクチック液晶のカイラルスメクチックC相の液晶分子配列を示す図

【図6】図5のカイラルスメクチック液晶を用いた可変焦点レンズの構成を示す構成図

【図7】図6の可変焦点レンズの作用を説明する説明図

【図8】カイラルコレステリック液晶を用いた図1の可変焦点レンズの第2の変形例の構成を示す構成図

【図9】図8の可変焦点レンズの作用を説明する説明図

【図10】図8のカイラルコレステリック液晶の反射率の実測値を示す図

【図11】ディスコチック液晶を用いた図1の可変焦点レンズの第2の変形例の構成を示す構成図

【図12】図11の可変焦点レンズの作用を説明する説明図

【図13】図11のディスコチック液晶の分子の屈折率楕円体を示す図

【図14】図12のディスコチック液晶をZ方向から見た時の第1の図

【図15】図12のディスコチック液晶をZ方向から見た時の第2の図

【図16】図1のカイラルネマチック液晶の配向を変化させるのに磁場を用いた可変焦点レンズの構成を示す構成図

【図17】図1のカイラルネマチック液晶の配向を変化させるのに温度変化を用いた可変焦点レンズの構成を示す構成図

【図18】本発明の第2の実施の形態に係る可変焦点レンズの構成を示す構成図

【図19】各実施の形態の可変焦点レンズを備えた第1の装置の構成を示す構成図

【図20】各実施の形態の変焦点レンズを備えた第2の装置の構成を示す構成図

【図21】各実施の形態の変焦点レンズを適用した第1の応用例の構成を示す構成図

【図22】図21の第1の応用例の作用を説明する説明図

【図23】各実施の形態の変焦点レンズを適用した第2の応用例の構成を示す構成図

【図24】図23の第2の応用例の作用を説明する説明図

【図25】各実施の形態の変焦点レンズを適用した第3の応用例の構成を示す構成図

【図26】図25の第3の応用例の作用を説明する説明図

【図27】各実施の形態の変焦点レンズを適用した第4の応用例の構成を示す構成図

【図28】各実施の形態の変焦点レンズを適用した第

5の応用例の構成を示す構成図

【図29】従来の変焦点レンズの構成を示す構成図

【図30】図29の変焦点レンズの作用を説明する説明図

【符号の説明】

1…変焦点レンズ

2…カイラルネマテック液晶

3…透明電極膜

4…平板ガラス

10 5…レンズ

6…配向膜

7…シール材

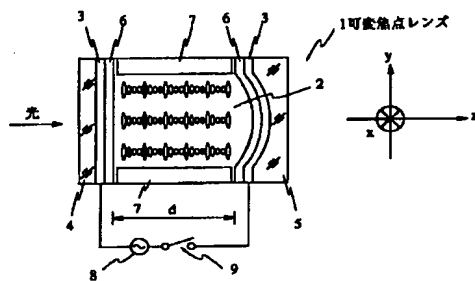
8…交流電源

9…スイッチ

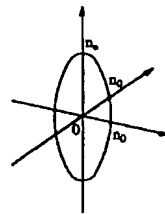
21…可変抵抗

代理人 弁理士 伊藤 進

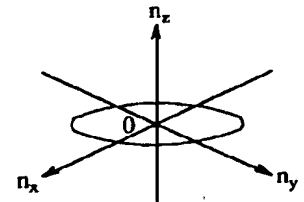
【図1】



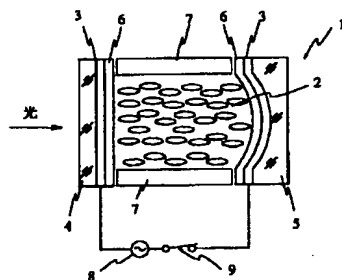
【図2】



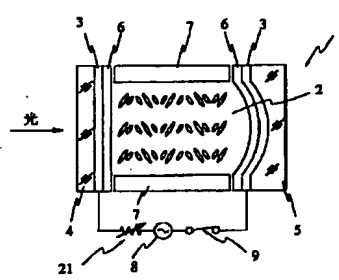
【図13】



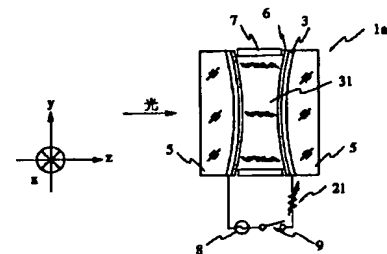
【図3】



【図4】



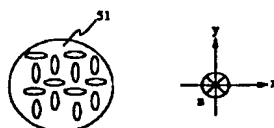
【図6】



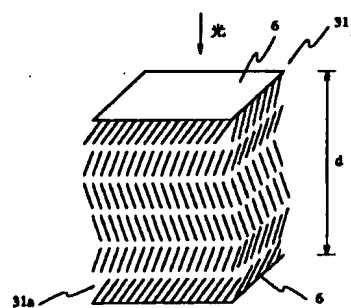
【図14】



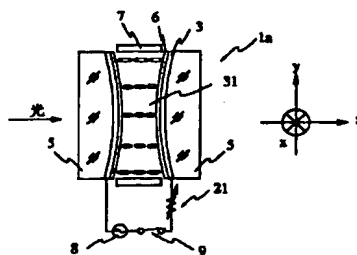
【図15】



【図5】

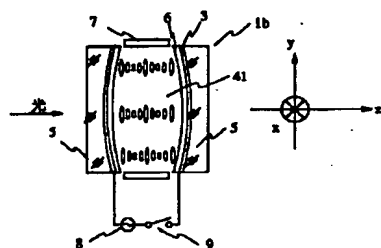


【図7】

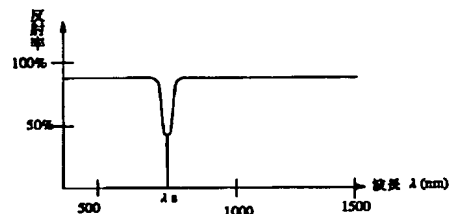
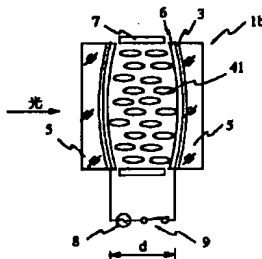


【図10】

【図8】

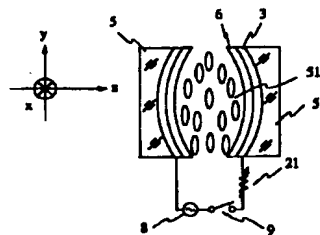


【図9】

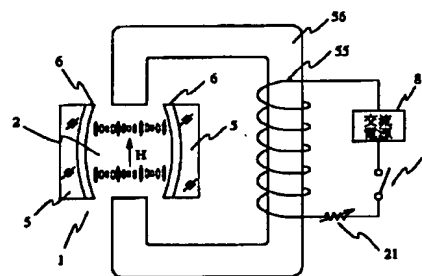
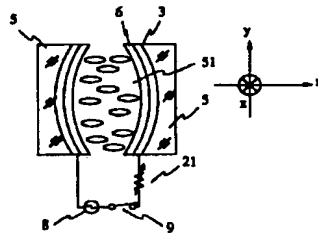


【図16】

【図11】

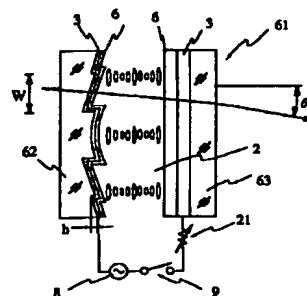
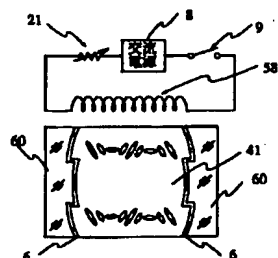


【図12】

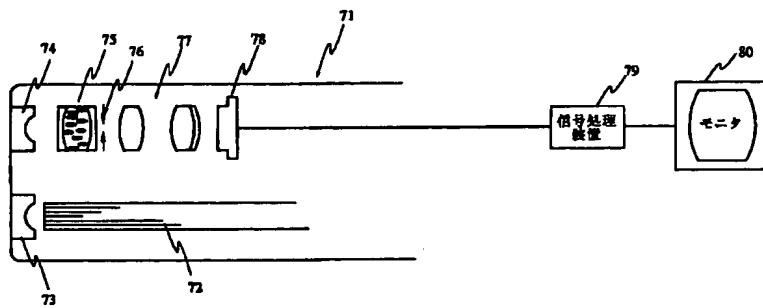


【図18】

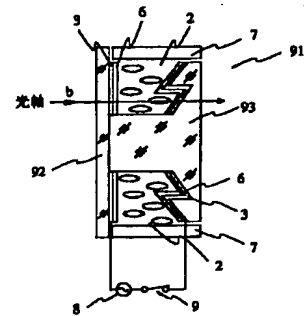
【図17】



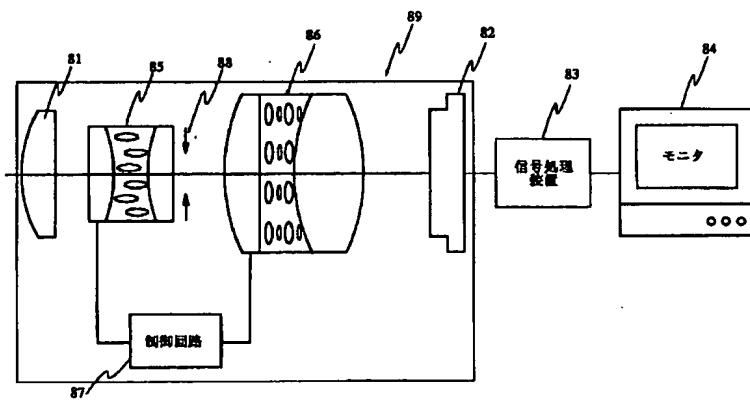
【図19】



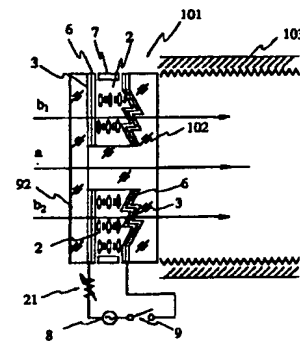
【図22】



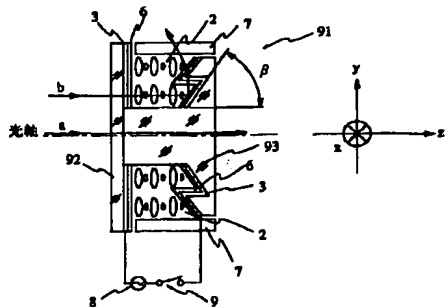
【図20】



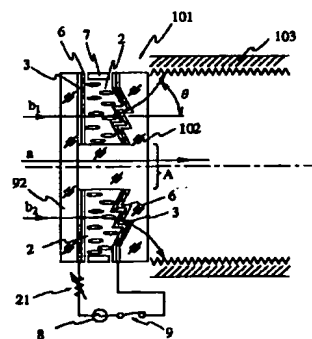
【図24】



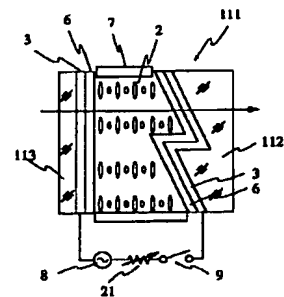
【図21】



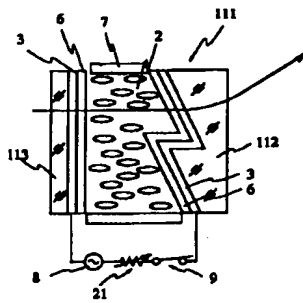
【図23】



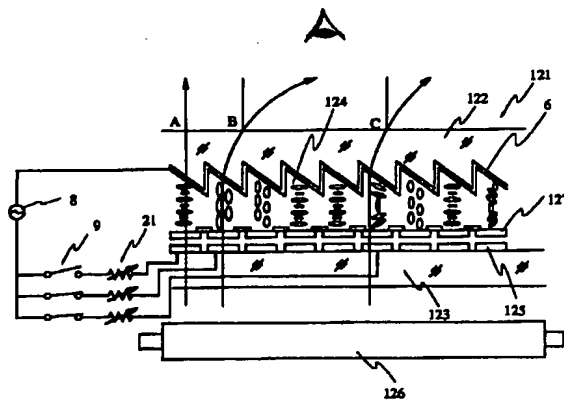
【図25】



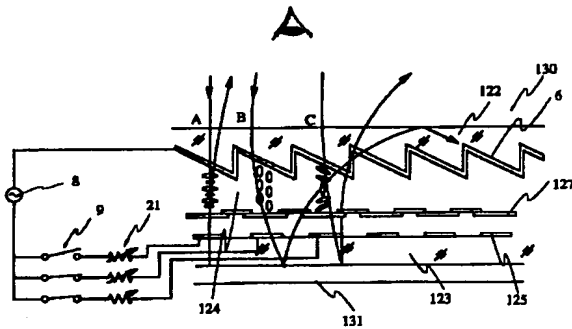
【図26】



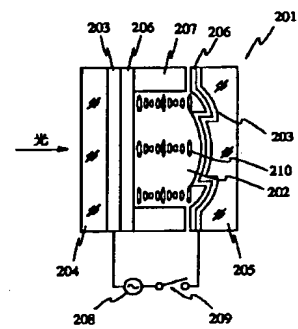
【図27】



【図28】



【図29】



【図30】

